

Primljen / Received: 11.3.2017.

Ispravljen / Corrected: 23.2.2018.

Prihvaćen / Accepted: 4.3.2018.

Dostupno online / Available online: 10.7.2018.

# Parametarska studija kolničke konstrukcije ojačane geocelijama

## Autori:



Dr.sc. **Samo Peter Medved**, dipl.ing.građ.  
LINEAL, Slovenija  
[samo.medved@lineal.si](mailto:samo.medved@lineal.si)



Izv.prof.dr.sc. **Bojan Žlender**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Mariboru  
Građevinski fakultet  
[bojan.zlender@um.si](mailto:bojan.zlender@um.si)



Doc.dr.sc. **Stanislav Lenart**, dipl.ing.građ.  
Slovenski institut za građevinarstvo  
Odjel za geotehniku i prometnice  
[stanislav.lenart@zag.si](mailto:stanislav.lenart@zag.si)

Prethodno priopćenje

**Samo Peter Medved, Bojan Žlender, Stanislav Lenart**

## Parametarska studija kolničke konstrukcije ojačane geocelijama

U radu je prikazano parametarsko ispitivanje kolničke konstrukcije ojačane geocelijama. Analiza temeljena na metodi konačnih elemenata uključuje model neojačane kolničke konstrukcije te model kolničke konstrukcije ojačane geocelijama, pri čemu se analiziraju razni položaji, debljine i čvrstoća geocelija. U okviru modela određen je i očekivani vijek trajanja kolničke konstrukcije. Rezultati parametarskog proučavanja u skladu su s rezultatima analitičkih rješenja, laboratorijskih i terenskih ispitivanja. Dobiveni rezultati upućuju na bitno poboljšanje nosivosti, smanjenje debljine asfaltnih slojeva i povećanje trajnosti kolničke konstrukcije kada je ona ojačana geocelijama.

### Ključne riječi:

savitljivi kolnik, geocelija, geosintetik, ojačano tlo, numeričko modeliranje

Preliminary report

**Samo Peter Medved, Bojan Žlender, Stanislav Lenart**

## Parametric study of geocell reinforced pavement

Parametric study of geocell reinforced pavement is presented in this paper. The FEM analysis models include unreinforced pavement structures and geocell-reinforced pavements with various geocell positions, thicknesses and strengths. The model output includes the expected life of the pavement. Parametric study results are consistent with the results of analytical solutions, laboratory tests, and field-test experiments. The results reveal a significant improvement in capacity, reduction in asphalt-layer thickness, and an increase in life expectancy of the geocell-reinforced pavement structure.

### Key words:

flexible pavement, geocell, geosynthetic, reinforced soil, numerical modelling

Vorherige Mitteilung

**Samo Peter Medved, Bojan Žlender, Stanislav Lenart**

## Parameteruntersuchung der durch Geozellen verstärkten Fahrbahnkonstruktion

In der Abhandlung wird die Parameteruntersuchung der die sich auf den Ergebnissen der FEM begründen. Die auf der FEM begründete Analyse umfasst das Modell der nicht verstärkten Fahrbahnkonstruktion sowie das Modell der durch Geozellen verstärkten Fahrbahnkonstruktion, wobei verschiedene Positionen, Stärken und Festigkeiten der Geozellen analysiert werden. Im Rahmen der Modelle wurde auch eine erwartete Nutzungsdauer der Fahrbahnkonstruktion festgelegt. Die Ergebnisse der Parameterstudie stimmen mit den Ergebnissen der analytischen Lösungen, der Labor- und Felduntersuchungen überein. Die erhaltenen Ergebnisse weisen auf eine wesentliche Verbesserung der Tragfähigkeit, die Verringerung der Stärke der Asphaltsschichten sowie die Erhöhung der Haltbarkeit der Fahrbahnkonstruktion hin.

### Schlüsselwörter:

flexible Fahrbahn, Geozellen, Geosynthetik, verstärkter Boden, numerische Modellierung

## 1. Uvod

Kolničke konstrukcije značajan su segment svake cestovne prometnice. One sudjeluju s barem četrdeset posto u ukupnim investicijskim troškovima gradnje ceste, te s otprilike sedamdeset posto u troškovima održavanja. Prema Statističkom godišnjaku o cestama za 2016. godinu [1], Europska unija ima više od 4,8 milijuna kilometara asfaltiranih cesta. Kako bi se ostvarila i na zahtijevanoj razini zadržala odgovarajuća kvaliteta tih prometnica, svake se godine treba izgraditi ili obnoviti barem 6 % ukupne duljine mreže. To za sobom povlači i upotrebu značajnih količina građevinskog materijala, veliku potrošnju energetskih resursa te značajne troškove. Zbog toga je iznalaženje alternativnih načina za projektiranje kolničkih konstrukcija ne samo trajan inženjerski izazov već i predmet brojnih analiza i studija.

U ovom se radu analiziraju savitljive kolničke konstrukcije ojačane geočelijama, istraživanjem utjecaja geočelija na razinu ojačanja kolničke konstrukcije. Osnovna je svrha istraživanja odrediti nosivost, trajnost i financijsku isplativost takvog rješenja, uz istovremeno pronalaženje načina za smanjenje potrošnje kako materijala tako i energije.

U novije vrijeme nekoliko istraživača kao npr. Cowland i Wong, Dash i dr., te Yang i dr. [2-5] analiziraju mogućnosti ojačanja tla te poboljšanja nosivosti nasipa primjenom geočelija. Oni su ustanovili da odgovarajuća geometrija geočelija djelotvorno pridonosi povećanju nosivosti. Drugi istraživači kao npr. Bathurst i Karpurapu [6], Rajagopal i dr. [7], Mengelt i dr. [8], Wasseloo i dr. [9] te Pokharel i dr. [10] analiziraju utjecaj geočelija na deformirano tlo te utjecaj geočelija na vrijednosti modula tla pri statičkom i dinamičkom opterećenju. Rezultati njihovih istraživanja pokazuju da se nosivost materijala u nosivom sloju kolničke konstrukcije može poboljšati pomoću geočelija, i to ovisno o vrsti i intenzitetu opterećenja te vrsti geočelija. Mengelt i dr. [8] istraživali su mogućnosti povećanja vrijednosti modula elastičnosti slojeva kolničke konstrukcije primjenom geočelija. U gore spomenutim radovima naglasak se stavlja na ispitivanje pojedinačnih slojeva geočelija. Rajagopal i dr. [7] i Wasseloo i dr. [9] ispitivali su deformacijske karakteristike kolničkih konstrukcija ojačanih pomoću nekoliko slojeva geočelija, pri čemu su koristili geočelije visine 100 mm i 200 mm. Dobiveni rezultati pokazuju da upotreba geočelija dovodi do smanjenja pojave kolotruga na površini kolnika. Al-Qadi i Hughes [11] proučavali su utjecaj geočelija visine 100 mm postavljenih na podlogu od netkanog geotekstila na nosivost kolnika. Analiza pomoću deflektometra s padajućim teretom (engl. falling weight deflectometer, FWD) pokazala je da je vrijednost modula elastičnosti povećana za dva puta u tri godine u slučaju kolnika ojačanih geočelijama. Latha i dr. [12] proveli su laboratorijsko ispitivanje geočelija na pješćanim materijalima i u tu su svrhu koristili geočelije izrađene od raznih vrsta geosintetika. Pokharel i dr. [10] istraživali su primjenu Neoloy polimernih geočelija u svrhu ojačanja neasfaltiranih cesta s lakim prometnim opterećenjem izvedenih na posteljici s CBR-om manjim od 3. To

istraživanje pokazuje da tanje i kruće geočelije mogu biti čak i djelotvornije od uobičajenih geočelija.

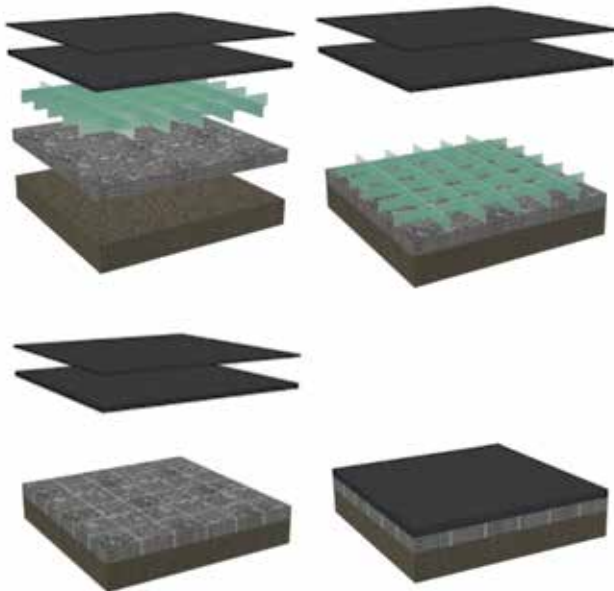
U ovom je radu prikazano parametarsko ispitivanje kolnika ojačanog geočelijama primjenom metode konačnih elemenata (MKE). Postupak se provodi postavljanjem geočelija u nosivi sloj kako bi se spriječila pretjerana horizontalna deformacija kolnika i povećala ukupna nosivost kolničke konstrukcije. U tu svrhu provedeno je opsežno istraživanje u okviru kojeg su analizirana analitička rješenja, provedene numeričke analize s parametarskim istraživanjem, eksperimentalne analize s laboratorijskim ispitivanjima te terensko ispitivanje. Čitavo se istraživanje temelji na prethodnim laboratorijskim ispitivanjima tipa TLS [13] koja su provedena pomoću novog uređaja za ispitivanje, takozvanog simulatora prometnog opterećenja (engl. *traffic load simulator* - TLS), izrađenog u Zavodu za graditeljstvo Slovenije (ZAG). Cilj ovog opsežnog istraživačkog projekta uključivao je provedbu laboratorijskih ispitivanja na kolničkim konstrukcijama prirodne veličine podvrgnutim prometnom opterećenju. Matematički model višeslojnog sustava uspostavljen je na temelju analize kolnika ojačanog geočelijama. Model kombinira poznate empirijske odnose s prikazom fizikalnih i mehaničkih karakteristika savitljivih kolničkih konstrukcija. Taj je matematički model koristan pokazatelj učinkovitosti kolničke konstrukcije, a njegova je primjena dokazana na osnovi rezultata TLS ispitivanja [14]. Eksperimentalne i teorijske analize upućuju na značajno poboljšanje nosivosti i smanjenje deformacija u slučajevima kada su korištene geočelije. Pomoću geočelija ostvareno je povećanje nosivosti i povećanje područja elastičnosti nevezanog nosivog sloja, uz istovremeno smanjenje trajnih deformacija kolničke konstrukcije. Ova je metoda ispitana u terenskim uvjetima na stvarnim kolničkim konstrukcijama ojačanim geočelijama koje su uspoređene s kolničkim konstrukcijama bez ojačanja. Učinkovitost geočelija potvrđena je i tijekom terenskih ispitivanja [14, 15]. Početni rezultati pokazuju da geočelije ugrađene u nevezane nosive slojeve kolničkih konstrukcija osiguravaju dodatnu savitljivost i dostatnu nosivost kolnika. Ova istraživanja će se nastaviti, ali će se u budućnosti veća pozornost posvetiti ponašanju kolničkih konstrukcija ojačanih geočelijama u ovisnosti o vremenu.

U ovom su radu prikazani samo rezultati parametarskog istraživanja provedenog na analiziranoj kolničkoj konstrukciji pomoću metode konačnih elemenata (MKE). Ostala laboratorijska i terenska ispitivanja prikazana su u drugim radovima [13-15].

## 2. Prikaz koncepcije kolničke konstrukcije ojačane geočelijama

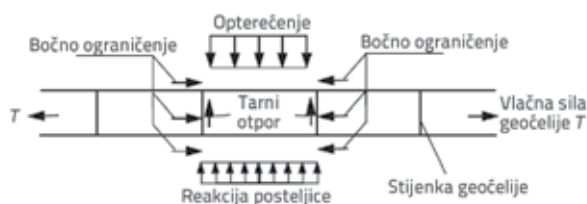
Kolničke se konstrukcije mogu ojačati polaganjem geočelija u nosivi sloj (slika 1.). To se radi kako bi se izbjegla pretjerana horizontalna deformacija nevezanih nosivih slojeva kolničke konstrukcije te kako bi se istovremeno povećala nosivost čitave kolničke konstrukcije. S obzirom na to da geočelije ograničavaju pomake u horizontalnom smjeru, tako pridonose i dodatnom horizontalnom učvršćivanju nosivog sloja.

Izgradnja kolničkih konstrukcija ojačanih geočelijama prilično je jednostavna. Geočelije se polažu u nosivi sloj te ispunjavaju šljunčanim materijalom. Materijal u čelijama najprije se vibrira pomoću vibroploče, nakon čega se upotrebljavaju teži nabijači kojima se provodi dinamičko i statičko nabijanje prethodno pripremljenog nosivog sloja. Ovu tehnologiju ugradnje ispitali su Medved i dr. [14], a terenska ispitivanja provedena u ovom području pokazuju da je ovakav postupak ugradnje učinkovit i jednostavan.



Slika 1. Konceptija izvođenja savitljivog kolnika ojačanog geočelijama: slojevi (gore lijevo), polaganje geočelija (gore desno), geočelije s nabijenim drobljenim kamenom (dolje lijevo) i konačna kolnička konstrukcija (dolje desno)

Nekoliko je autora detaljno opisalo mehanizme ojačanja kolničkih konstrukcija pomoću geočelija [16-18]. Općenito uzevši, razlikujemo tri osnovna mehanizma pomoću kojih geočelije pridonose povećanju nosivosti slojeva kolničkih konstrukcija: mehanizam bočne otpornosti (djelovanje čelija), mehanizam raspodjele naprezanja te mehanizam membranskog efekta. Mehanizam bočne otpornosti nastaje zbog trenja između geosintetičkog ojačanja i tla. U tom slučaju, posmično naprezanje trenjem se učinkovito prenosi s tla na geosintetičko ojačanje gdje se javljaju vlačne sile. Poprečni presjek s prikazom posmične sile jednog segmenta dan je na slici 2.



Slika 2. Mehanizam bočne otpornosti, Ling [17]

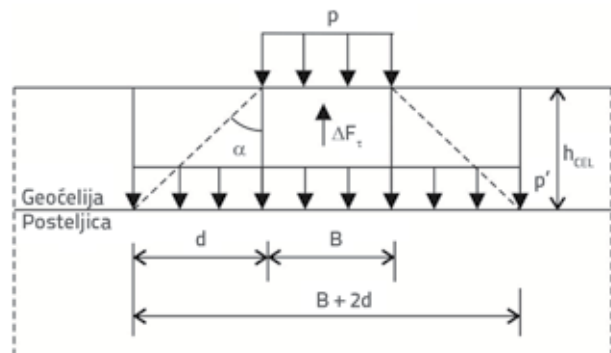
Efekt ograničenja bočnog širenja predstavlja zbroj posmičnih sila koje se javljaju pri opterećenju jednog segmenta, a dobiva se množenjem broja opterećenih čelija s posmičnom silom jednog segmenta [18].

$$\Delta F_{\tau} = 4 \cdot \frac{h}{d} \cdot k_0 \cdot p \cdot B \cdot L \cdot \tan \delta \quad (1)$$

gdje je:  $\Delta F_{\tau}$  zbroj posmičnih sila jednog segmenta pod opterećenjem,  $h/d$  je omjer oblika geočelije,  $k_0$  je bočni tlak tla pri tlaku mirovanja ( $k_0 = 1 - \sin \varphi'$ ), vrijednosti  $B$  i  $L$  označavaju širinu i dužinu opterećenja,  $\delta$  je kut trenja na kontaktu između zapune i stijenke geočelije, a  $p$  je opterećenje na vrhu geočelije. Slike 3. i 4. prikazuju mehanizam nosivosti i vektore sila koji nastaju uslijed mehanizma membranskog efekta. Drugi učinak poboljšanja je mehanizam raspodjele naprezanja [16]. Naprezanje na gornjoj razini geočelija smanjuje se na donjoj razini, tj. smanjuje se s vrijednosti  $p$  na vrijednost  $p'$ .

$$p' = \frac{(B + 2 \cdot h_{CEL} \cdot \tan \alpha)}{B} \quad (2)$$

gdje je:  $p$  naprezanje na gornjoj razini geočelije,  $p'$  je naprezanje na donjoj razini geočelije,  $B$  je širina opterećenja,  $h_{CEL}$  je visina geočelija, a  $\alpha$  je kut raspodjele naprezanja.



Slika 3. Mehanizam povećanja nosivosti raspoređivanjem naprezanja

Treći učinak poboljšanja odnosi se na mehanizam membranskog efekta [17] koji se aktivira kada se kod ojačanja tla već bilježi određeni stupanj deformacije. Povećanje nosivosti izračunava se iz vlačne sile geočelija:

$$\Delta p = \frac{2 \cdot T \cdot \sin \alpha}{B} \quad (3)$$

Vlačna je sila dobivena pomoću izraza (4):

$$T = E_{CEL} \cdot \epsilon_{CEL} \cdot h_{CEL} \quad (4)$$

gdje je:  $\Delta p$  povećanje nosivosti,  $B$  je širina ravnomjernog opterećenja,  $E_{CEL}$  je modul elastičnosti geočelije;  $\epsilon_{CEL}$  je vlačna deformacija sloja geočelije,  $h_{CEL}$  je visina geočelija, a  $\alpha$  je horizontalni kut vlačne sile  $T$ . Slika 4. prikazuje mehanizam nosivosti baziran na efektu membrane i vektora sile.



Slika 4. Mehanizam učinka membrane

### 3. Svojstva materijala

#### 3.1. Geočelije

Geočelije su sastavljene od vertikalno usmjerenih traka koje formiraju čelije pravokutnog, četvrtastog ili šesterokutnog oblika (slika 5.). Kameni se materijal polaže u čelije te zbija do optimalne vrijednosti. Čelije moraju biti prikladne veličine: razmak između pojedinih traka mora biti najmanje tri puta veći od najvećeg zrna, a ne smije biti manji od debljine slojeva (tj. od debljine sloja koji sadrži geočelije). Visina geočelija varira od 5 do 20 cm, a većina istraživača svoja je istraživanja bazirala na geočelijama visine od 10 do 20 cm. Geočelije se mogu postaviti u dva krajnja položaja unutar nosivog sloja kolničke konstrukcije: u krajnji položaj koji je u kontaktu s tlom te u krajnji položaj u kontaktu s asfaltom.

Geočelije su prepoznate kao prikladan geosintetički materijal za ojačanje zrnatog tla cesta, tj. kao sredstvo za povećanje otpornosti na statičko i dinamičko opterećenje vozila. U analizi je usvojena vrijednost krutosti geočelija s modulom elastičnosti koji varira od 200 do 3000 MPa.



Slika 5. Geočelije u kolničkoj konstrukciji prije polaganja asfalta

#### 3.2. Asfaltni slojevi

U analizi se asfaltni sloj tretira kao elastični materijal s određenim vrijednostima modula elastičnosti  $E_{AC}$  i Poissonovog koeficijenta  $\nu_{AC}$ . Zamor asfalta uslijed ponavljano opterećenja iskazuje se kao maksimalni broj cikličnog ponavljanja opterećenja u funkciji deformacije.

#### 3.3. Nosivi i tamponski sloj

Modul elastičnosti nosivog sloja može se iskazati kao konstantna vrijednost po čitavoj visini sloja ili kao vrijednost

ovisna o naprezanju. U analizi koja se prikazuje u ovom radu, modul elastičnosti iskazuje se ovisno o naprezanju prema modificiranom Witczakovom i Uzanovom [19] modelu u kojem se umjesto devijatorskog naprezanja koristi oktaedarsko posmično naprezanje prema izrazu (5):

$$M_r = k_1 \cdot p_a \cdot \left(\frac{q}{p_a}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a}\right)^{k_3} \quad (5)$$

gdje su:  $k_1$ ,  $k_2$  i  $k_3$  konstante regresijske analize određene višestrukom regresijskom analizom eksperimentalnih podataka. Pritom je korištena i Austroroadsova teorija [20].

Kriteriji kakvoće i postupci za istraživanje mješavina kamenog materijala koji se primjenjuju za nevezane nosive i tamponske slojeve definirani su u skladu s europskim normama [21-25].

### 4. Uvjeti opterećenja

Primjenjen je pojednostavljeni postupak za projektiranje kolničkih konstrukcija ESAL (eng. *Equivalent Single Axle Load*), tj. postupak koji se temelji na određivanju istovrijednog jednoosovinskog opterećenja. U prikazanoj analizi, ESAL je definiran kao jednostruka osovina s dva dvostruka kotača koja prenosi opterećenje od 100 kN uz inflacijski tlak u gumi od 690 kPa.

#### 4.1. Kriteriji

##### 4.1.1. Jedan ciklus opterećenja

Za svaki ciklus opterećenja, u analizi se trebaju uzeti u obzir kriteriji koji se ovdje navode. Vrijednosti vlačne deformacije asfaltnog sloja  $\varepsilon_{tA}$  i vlačne deformacije slojeva geočelija  $\varepsilon_{tCEL}$  uvećane za faktor sigurnosti  $SF$ , trebaju biti niže od dopuštene deformacije  $\varepsilon_{t,lim}$  [16, 17].

$$SF \cdot \varepsilon_{tA} \leq \varepsilon_{tA,lim} \quad (6)$$

$$SF \cdot \varepsilon_{tCEL} \leq \varepsilon_{tCEL,lim} \quad (7)$$

Odnos naprezanja i deformacije u nosivom sloju i tamponskom sloju (ako je prisutan), te u posteljici, treba biti unutar linija popuštanja u  $p - q$  ravnini (Hornych i dr. [26]):

$$SF \cdot \sigma_{dB} \leq q_{fB} \quad (8)$$

gdje je:  $\sigma_{dB}$  devijatorsko naprezanje u donjem sloju,  $SF$  je faktor sigurnosti, a  $q_{fB}$  je maksimalno naprezanje, definirano prema linijama popuštanja materijala u  $p - q$  ravnini (temeljeno na laboratorijskim ispitivanjima). Sličan se odnos primjenjuje i za tamponski sloj i posteljicu:

$$SF \cdot s_{dSB} \leq q_{fSB} \quad (9)$$

$$SF \cdot s_{dSG} \leq q_{fSG} \quad (10)$$

Vertikalna deformacija nosivog sloja, tamponskog sloja i posteljice treba biti niža od dopoštene vrijednosti  $\varepsilon_{v,lim}$

$$SF \cdot \varepsilon_{vB} \leq \varepsilon_{vB,lim} \quad (11)$$

$$SF \cdot \varepsilon_{vSB} \leq \varepsilon_{vSB,lim} \quad (12)$$

$$SF \cdot \varepsilon_{vSG} \leq \varepsilon_{vSG,lim} \quad (13)$$

#### 4.2.1. Ponavljano opterećenje

Očekivano trajanje kolničke konstrukcije izračunava se simuliranjem deformacija uslijed prometnog opterećenja te primjenom empirijske prijenosne funkcije u svrhu određivanja dopuštenog broja ponavljanja za svako opterećenje. Ako je primijenjeni broj ponavljanja veći od dopuštenog broja ponavljanja, tada se smatra da je kolnička konstrukcija popustila. Za određivanje maksimalnog broja ponavljanja prometnog opterećenja mogu se primijeniti razne korelacije. Korelacija prema [27] koristi se za određivanje vlačne deformacije asfalta i maksimalnog broja cikličnih ponavljanja prometnog opterećenja  $N_F$  prema izrazu (14):

$$N_F = C_F \cdot K_{F1} \cdot \varepsilon_{tA}^{-K_{F2}} \cdot E_A^{-K_{F3}} \quad (14)$$

gdje je:  $E_A$  dinamički modul elastičnosti asfalta (psi),  $\varepsilon_{tA}$  je bočna deformacija asfalta,  $C_F$  je faktor korekcije a  $K_{F1}$ ,  $K_{F2}$ ,  $K_{F3}$  su konstante.

U predviđanju trajne deformacije kolničke konstrukcije primjenjeni su sljedeći odnosi koje predlažu Tseng i Lytton [28]:

$$\varepsilon_{v,B,p} = \varepsilon_{v,B,max} \cdot e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)\beta} \quad (15)$$

gdje je  $\varepsilon_{v,B,max}$  maksimalna trajna deformacija pri vrlo velikom broju ciklusa opterećenja, dok su  $\rho$  i  $\beta$  parametri. Parametri  $\varepsilon_{v,B,max}$ ,  $\rho$  i  $\beta$  definirani su u okviru laboratorijskih ispitivanja pomoću troosnog uređaja za ispitivanje ponavljano opterećenja, pri čemu su primjenjeni postupci koje predlažu Tseng i Lytton [28]. Ako uzmemo u obzir debljinu osnovnog sloja  $h$ , trajna vertikalna deformacija sloja može se iskazati kako slijedi:

$$\delta_{v,B,p} = \frac{\varepsilon_{v,B,max}}{\varepsilon_{v,B,r}} \cdot e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)\beta} \cdot \varepsilon_{v,B} \cdot h \quad (16)$$

gdje je:  $\varepsilon_{v,B,r}$  elastična deformacija u jednom ciklusu opterećenja izračunana pomoću MKE.

Prema kriteriju za pojavu kolotruga u posteljici [27], maksimalan broj cikličnih ponavljanja prometnog opterećenja  $N_R$  iznosi

$$N_R = C_R \cdot K_{R1} \cdot \varepsilon_{vA}^{-K_{R2}} \cdot E_A^{-K_{R3}} \quad (17)$$

gdje je  $C_R$  korekcijski faktor dok su  $K_{R1}$ ,  $K_{R2}$  konstante.

## 5. Analize pomoću metode konačnih elemenata

Analiza naprezanja i deformacija u kolničkoj konstrukciji temeljena na metodi konačnih elemenata (MKE) provedena je pomoću programa Everstress [29]. Analiza je provedena kako bi se odredio utjecaj ojačanja na kolničku konstrukciju, a kontrolni su proračuni obavljani pomoću programa Plaxis [30]. Usporedba rezultata ukazuje na dobru podudarnost podataka o pomaku i naprezanjima. Izrađena su dva različita modela:

- osnovni model bez ojačanja
- model u kojem je nosivi sloj ojačan geočelijama.

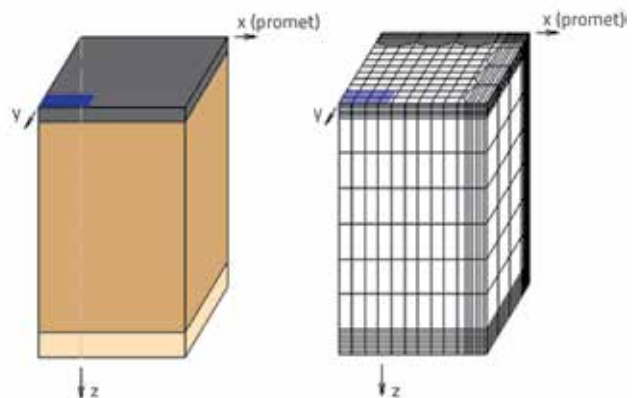
U drugom modelu, položaj geočelija u nosivom sloju variran je od dna prema vrhu. U analizi je primijenjeno prometno osovinsko opterećenje od  $F = 100$  kN s inflacijskim tlakom u gumama od  $p = 690$  kPa. U analizi rezultata razmatrana su tri kriterija: vlačna deformacija asfalta, vertikalna deformacija u nosivom sloju i vertikalna deformacija na razini posteljice (izrazi 11-13, 16, 17).

### 5.1. Neojačana kolnička konstrukcija

Osnovni numerički model sastojao se od asfaltnog sloja debljine  $d_A$ , nosivog sloja debljine  $d_B$  i posteljice konstantne debljine  $d_{SG} = 150$  cm. Analiza je provedena za različite debljine asfaltnog sloja  $d_A$  i za debljinu nosivog sloja  $d_B$ , a debljina posteljice bila je konstantna, tj.  $d_{SG} = 150$  cm. U proračunima je korištena varijabilna vrijednost  $E_{SG}$ , a krutost je asfalta  $E_A$  i nosivog sloja  $E_B$  bila konstantna. Navode se svojstva pojedinih slojeva:

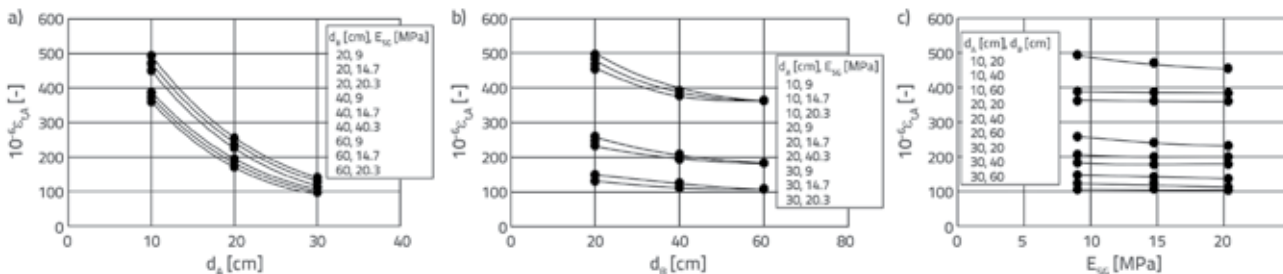
- asfaltni sloj ( $E_A = 3$  GPa,  $\nu_A = 0,40$ ,  $d_A = 10, 20, 30$  cm)
- nosivi sloj ( $k_1 = 200$  MPa,  $k_2 = 0,5$ ,  $k_3 = 0$ ,  $\nu_B = 0,3$ ,  $d_B = 20, 40, 60$  cm)
- posteljica ( $E_{SG} = 9; 14,7; 20,3$  MPa,  $\nu_{SG} = 0,45$ ,  $d_{SG} = 150$  cm).

Simetrični model konstrukcije korišten u metodi konačnih elemenata prikazan je na slici 6. Analizom neojačane kolničke konstrukcije na bazi metode konačnih elemenata za svojstva slojeva  $d_A$ ,  $d_B$ ,  $E_{SG}$  dobiveni su sljedeći rezultati: vlačna deformacija asfalta  $\varepsilon_{tA}$ , vertikalna deformacija nosivog sloja  $\varepsilon_{vB}$ , vertikalna deformacija posteljice  $\varepsilon_{vSG}$ , broj ponavljanja prometnog opterećenja  $N_F$  i  $N_R$ .



Slika 6. Numerički model bez geočelije





Slika 7. Odnos vlačne čvrstoće asfalta  $\epsilon_{tA}$  i: a) debljine asfaltnog sloja  $d_A$  za razne debljine nosivog sloja  $d_B$  te za razne krutosti posteljice  $E_{SG}$ ; b) debljine nosivog sloja  $d_B$  za razne vrijednosti debljine asfaltnog sloja  $d_A$  te za razne krutosti posteljice  $E_{SG}$ ; c) krutosti posteljice  $E_{SG}$  za razne debljine asfaltnog sloja  $d_A$  i za debljinu nosivog sloja  $d_B$

### 5.1.1. Vlačna deformacija asfalta

Korelacija između vlačne deformacije asfalta  $\epsilon_{tA}$  i debljine asfaltnog sloja  $d_A$  za razne vrijednosti debljine nosivog sloja  $d_B$  i posteljice  $E_{SG}$  prikazana je na slici 7.a. Dobiveni rezultati pokazuju da debljina asfaltnog sloja  $d_A$  bitno utječe na vlačnu deformaciju asfalta  $\epsilon_{tA}$ . Korelacija između vlačne deformacije asfalta  $\epsilon_{tA}$  i debljine nosivog sloja  $d_B$  za razne vrijednosti debljine asfaltnog sloja  $d_A$  i posteljice  $E_{SG}$  prikazana je na slici 7.b. Dobiveni rezultati pokazuju da debljina nosivog sloja  $d_B$  bitno utječe na vlačnu deformaciju asfalta  $\epsilon_{tA}$  samo u slučaju velikih deformacija (slijeganja) kolničke konstrukcije. Korelacija između vlačne deformacije asfalta  $\epsilon_{tA}$  i krutosti posteljice  $E_{SG}$  za razne vrijednosti debljine asfaltnog sloja  $d_A$  te za debljinu nosivog sloja  $d_B$  prikazana je na slici 7.c. Dobiveni rezultati potvrđuju da krutost posteljice  $E_{SG}$  malo utječe na vlačnu deformaciju asfaltnog sloja  $e_{tA}$  ako je kolnička konstrukcija prikladno dimenzionirana (niske vrijednosti slijeganja).

Usporedba rezultata vlačne čvrstoće u asfaltu  $e_{tA}$  između neojačane kolničke konstrukcije i kolničke konstrukcije ojačane geočelijama ispod asfalta pokazuje da tanak sloj asfalta i odgovarajuća krutost čelija može na vlačnu deformaciju asfalta  $e_{tA}$  utjecati u istoj mjeri kao i povećanje debljine asfaltnog sloja.

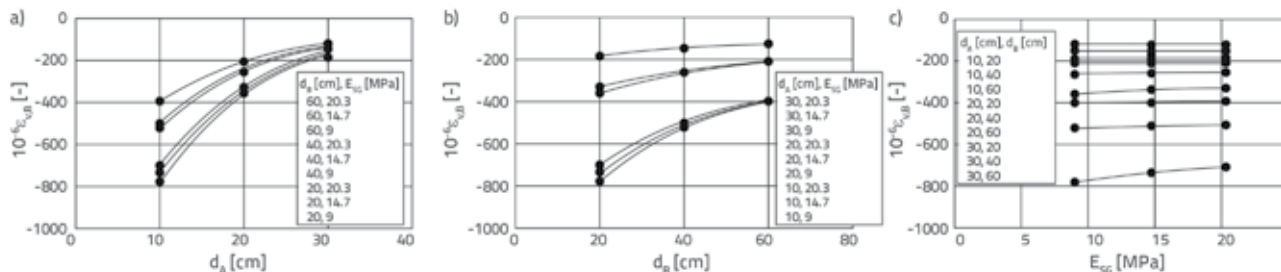
### 5.1.2. Vertikalna deformacija nosivog sloja

Korelacija između vertikalne deformacije nosivog sloja  $\epsilon_{vB}$  i debljine asfaltnog sloja  $d_A$  za razne debljine nosivog sloja

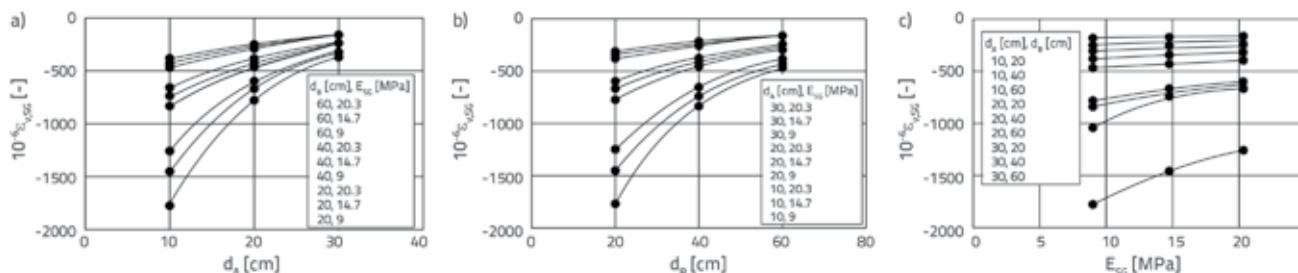
$d_B$  i za razne krutosti posteljice  $E_{SG}$  prikazana je na slici 8.a. Rezultati pokazuju da debljina asfaltnih slojeva  $d_A$  bitno utječe na vertikalnu deformaciju nosivog sloja  $\epsilon_{vB}$ . Korelacija između vertikalne deformacije nosivog sloja  $\epsilon_{vB}$  i debljine nosivog sloja  $d_B$  za razne debljine asfaltnog sloja  $d_A$  i krutosti posteljice  $E_{SG}$  prikazana je na slici 8.b. Rezultati potvrđuju da debljina nosivog sloja  $d_B$  bitno utječe na vertikalnu deformaciju nosivog sloja  $\epsilon_{vB}$ . Korelacija između vertikalne deformacije nosivog sloja  $\epsilon_{vB}$  i krutosti posteljice  $E_{SG}$  za razne debljine asfaltnog sloja  $d_A$  i za debljinu nosivog sloja  $d_B$  prikazana je na slici 8.c. Rezultati pokazuju da krutost posteljice  $E_{SG}$  malo utječe na vertikalnu deformaciju nosivog sloja  $\epsilon_{vB}$  ako je kolnička konstrukcija prikladno dimenzionirana (niske vrijednosti slijeganja). Usporedba rezultata vertikalne deformacije nosivog sloja  $e_{vB}$  između neojačane kolničke konstrukcije i kolničke konstrukcije ojačane geočelijama ispod asfalta, pokazuje da tanak sloj asfalta i odgovarajuća krutost geočelija mogu dovesti do smanjenja vertikalne deformacije u nosivom sloju ali ne mogu utjecati u istoj mjeri kao i povećanje debljine asfaltnog sloja.

### 5.1.3. Vertikalna deformacija posteljice

Korelacija između vertikalne deformacije u posteljici  $\epsilon_{vSG}$  i debljine asfaltnih slojeva  $d_A$  za različite vrijednosti debljine nosivog sloja  $d_B$  i krutosti posteljice  $E_{SG}$  prikazana je na slici 9.a. Rezultati pokazuju da debljina asfaltnih slojeva  $d_A$  bitno utječe na vertikalnu deformaciju posteljice  $\epsilon_{vSG}$ . Korelacija između vertikalne deformacije posteljice  $\epsilon_{vSG}$  i debljine nosivog sloja  $d_B$  za



Slika 8. Usporedba vertikalne deformacije nosivog sloja  $\epsilon_{vB}$  i: a) debljine asfaltnog sloja  $d_A$  za razne debljine nosivog sloja  $d_B$  i posteljice  $E_{SG}$ ; b) debljine nosivog sloja  $d_B$  za razne vrijednosti debljine asfaltnog sloja  $d_A$  i krutosti posteljice  $E_{SG}$ ; c) krutosti posteljice  $E_{SG}$  za razne vrijednosti debljine asfaltnog sloja  $d_A$  i za debljinu nosivog sloja  $d_B$



Slika 9. Odnos između vertikalne deformacije posteljice  $\varepsilon_{v,SG}$  i: a) debljine asfaltnog sloja  $d_A$  pri raznim vrijednostima debljine nosivog sloja  $d_B$  i krutosti posteljice  $E_{SG}$ ; b) debljine nosivog sloja  $d_B$  pri raznim vrijednostima debljine asfaltnog sloja  $d_A$  i krutosti posteljice  $E_{SG}$ ; c) krutost posteljice  $E_{SG}$  pri raznim vrijednostima debljine asfaltnog sloja  $d_A$  i debljine nosivog sloja  $d_B$

razne vrijednosti debljine asfaltnog sloja  $d_A$  i krutosti posteljice  $E_{SG}$  prikazana je na slici 9.b. Rezultati potvrđuju da debljina nosivog sloja  $d_B$  bitno utječe na vertikalnu deformaciju posteljice  $\varepsilon_{v,B}$ . Korelacija između vertikalne deformacije posteljice  $\varepsilon_{v,SG}$  i krutosti posteljice  $E_{SG}$  za razne vrijednosti debljine asfaltnog sloja  $d_A$  i za debljinu nosivog sloja  $d_B$  prikazana je na slici 9.c. Rezultati pokazuju da krutost posteljice  $E_{SG}$  utječe na vertikalnu deformaciju posteljice  $\varepsilon_{v,SG}$  ako kolnička konstrukcija nije prikladno dimenzionirana.

### 5.2. Ojačana kolnička konstrukcija

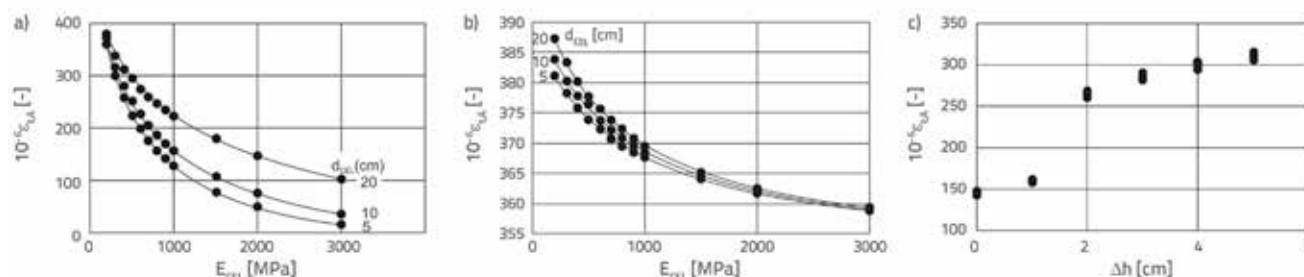
Numerički model ojačane kolničke konstrukcije, s geočelijama u nosivom sloju, sastoji se od asfaltnog sloja debljine  $d_A$ , gornjeg nosivog sloja debljine  $d_{B,UP}$ , geočelijskog sloja debljine  $d_{CEL}$ , donjeg nosivog sloja debljine  $d_{B,D}$  te od posteljice konstantne debljine  $d_{SG} = 150$  cm. Analize su provedene s konstantnom debljinom asfaltnog sloja  $d_A$  i nosivog sloja  $d_B$  dok je debljina geočelija  $d_{CEL}$  bila promjenljiva. U proračunu posteljice korištena je promjenljiva vrijednost  $E_{SG}$  i promjenljiva krutost geočelija, a vrijednosti krutosti asfalta  $E_A$  i nosivog sloja  $E_B$  bile su konstantne. Svojstva pojedinih slojeva sažeto se mogu prikazati kako slijedi:

- asfaltni sloj ( $E_A = 3$  GPa,  $\nu_A = 0.40$ ,  $d_A = 10$  cm)
- gornji nosivi sloj ( $k_1 = 200$  MPa,  $k_2 = 0.5$ ,  $k_3 = 0$ ,  $\nu_B = 0.3$ ,  $d_B = 0$  do  $40$  cm -  $d_{CEL}$ )
- geočelije ( $E_{CEL} = 200 - 3000$  MPa,  $\nu = 0.20$ ,  $d_{CEL} = 5, 10, 15$  cm)
- donji nosivi sloj ( $k_1 = 200$  MPa,  $k_2 = 0.5$ ,  $k_3 = 0$ ,  $\nu_B = 0.3$ ,  $d_B = 0$  do  $40$  cm -  $d_{CEL}$ )
- posteljica ( $E_{SG} = 9; 14.7; 20.3$  MPa,  $\nu_{SG} = 0.45$ ,  $d_{SG} = 150$  cm).

Općenito uzevši, analizirana su tri modela ojačanih kolničkih konstrukcija: s geočelijama na vrhu nosivog sloja, s geočelijama u nosivom sloju te s geočelijama neposredno ispod asfaltnog sloja. Rezultati analize MKA za ojačanu kolničku konstrukciju sa svojstvima slojeva  $d_A, d_B, d_{CEL}, E_A, E_{CEL}, E_B, E_{SG}$  iskazani su u obliku: vlačne deformacije asfalta  $\varepsilon_{t,A}$ , vlačne deformacije geočelija  $\varepsilon_{CEL}$ , vertikalne deformacije nosivog sloja  $\varepsilon_{v,B}$ , vertikalne deformacije posteljice  $\varepsilon_{v,SG}$  i broja ponavljanja prometnog opterećenja  $N_F$  i  $N_F$ .

#### 5.2.1. Vlačna deformacija asfalta

Slika 10.a prikazuje korelaciju između vlačne deformacije asfalta  $\varepsilon_{t,A}$  i krutosti geočelija  $E_{CEL}$  za geočelije koje se nalaze neposredno ispod asfaltnog sloja, gdje debljina geočelije iznosi  $d_{CEL} = 10$  cm a krutost posteljice je  $E_{SG} = 20,3$  MPa. Rezultati pokazuju da krutost geočelije  $E_{CEL}$  bitno utječe na vlačnu deformaciju asfalta  $\varepsilon_{t,A}$ . Debljina geočelija  $d_{CEL}$  također bitno utječe na vlačnu deformaciju asfalta  $\varepsilon_{t,A}$ . Na slici 10.b prikazana je korelacija između vlačne deformacije asfalta  $\varepsilon_{t,A}$  i krutosti geočelija  $E_{CEL}$  za razne vrijednosti debljine geočelije  $d_{CEL}$  i krutosti posteljice  $E_{SG}$  - geočelije su u kontaktu s posteljicom. Rezultati pokazuju da geočelije ne utječu bitno na vlačnu deformaciju asfalta  $\varepsilon_{t,A}$ . Analizirana je udaljenost geočelija od asfalta  $\Delta h$ . Na slici 10.c prikazana je korelacija između vlačne deformacije asfalta  $\varepsilon_{t,A}$  i udaljenosti geočelija od asfalta za određene karakteristike geočelija ( $E_{CEL} = 2000$  MPa,  $d_{CEL} = 5$  cm) i uvjete tla ( $E_{SG} = 9-20,3$  MPa). Rezultati pokazuju da je vlačna deformacija asfalta  $\varepsilon_{t,A}$  najniža kada su geočelije u kontaktu s asfaltom ili kada su vrlo malo udaljene od asfalta. Uočava se značajno povećanje vlačne deformacije asfalta



Slika 10. a) Odnos između tipične deformacije asfalta  $\varepsilon_{t,A}$  i krutosti geočelija  $E_{CEL}$ ; b) Odnos između vlačne deformacije asfalta  $\varepsilon_{t,A}$  i krutosti geočelije  $E_{CEL}$  za razne debljine geočelija  $d_{CEL}$ ; geočelije su u kontaktu s posteljicom; c) Odnos vlačne deformacije asfalta  $\varepsilon_{t,A}$  i udaljenosti između geočelija i asfalta  $\Delta h$

kada je udaljenost između geočelija i asfalta veća od 1 cm. Kada je ta udaljenost veća od 2 cm, vlačna čvrstoća asfalta konstantno raste usporedo s porastom razmaka, ali ipak sporije.

Na temelju ove analize može se zaključiti da položaj geočelija bitno utječe na poprečna naprezanja u asfaltu, te da je smještaj geočelija neposredno ispod asfalta povoljan jer bitno pridonosi smanjenju razine deformacije. Pozitivni učinak primjene geočelija brzo se smanjuje s porastom dubine ugradnje.

### 5.2.2. Vertikalna deformacija u nosivom sloju

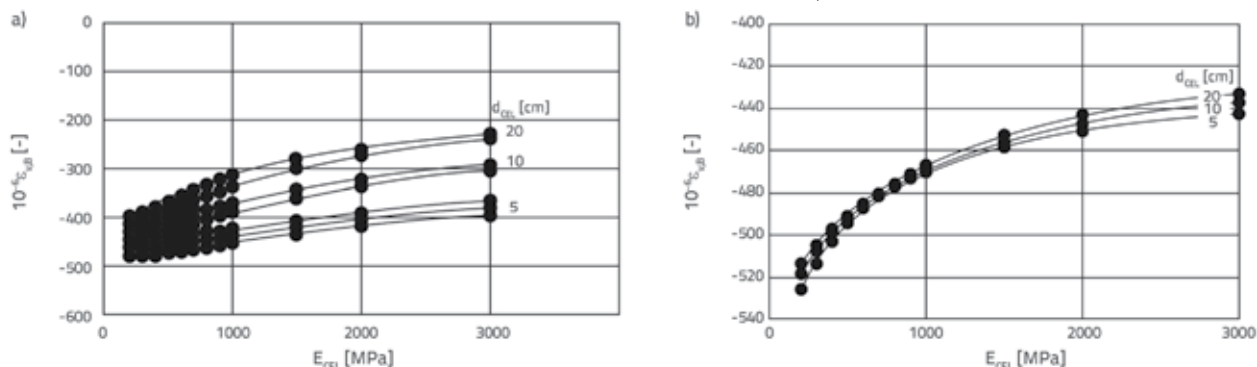
Na slici 11.a prikazana je korelacija između vertikalne deformacije u nosivom sloju  $\epsilon_{v,B}$  i krutosti geočelije  $E_{CEL}$  kada su geočelije neposredno ispod asfaltnog sloja, a za razne vrijednosti debljine geočelije  $d_{CEL}$  i krutosti posteljice  $E_{SG}$ . Rezultati pokazuju da krutost geočelija  $E_{CEL}$  i debljina geočelija  $d_{CEL}$  bitno utječu na vertikalnu deformaciju nosivog sloja  $\epsilon_{v,B}$ . Na slici 11.b prikazana je korelacija između vertikalne deformacije nosivog sloja  $\epsilon_{v,B}$  i krutosti geočelija  $E_{CEL}$  (geočelije su u kontaktu s posteljom), za razne debljine geočelija  $d_{CEL}$ . Rezultati pokazuju da krutost geočelija  $E_{CEL}$  bitno utječe na vertikalnu deformaciju nosivog sloja  $\epsilon_{v,B}$  ali i da debljina geočelija  $d_{CEL}$  ne utječe bitno na vertikalnu deformaciju nosivog sloja  $\epsilon_{v,B}$ . Rezultati za geočelije u nosivom sloju variraju između krajnjih vrijednosti prikazanih na slikama 11.a i 11.b te ovise o udaljenosti između geočelija i asfalta.

### 5.2.3. Vertikalna deformacija u posteljici

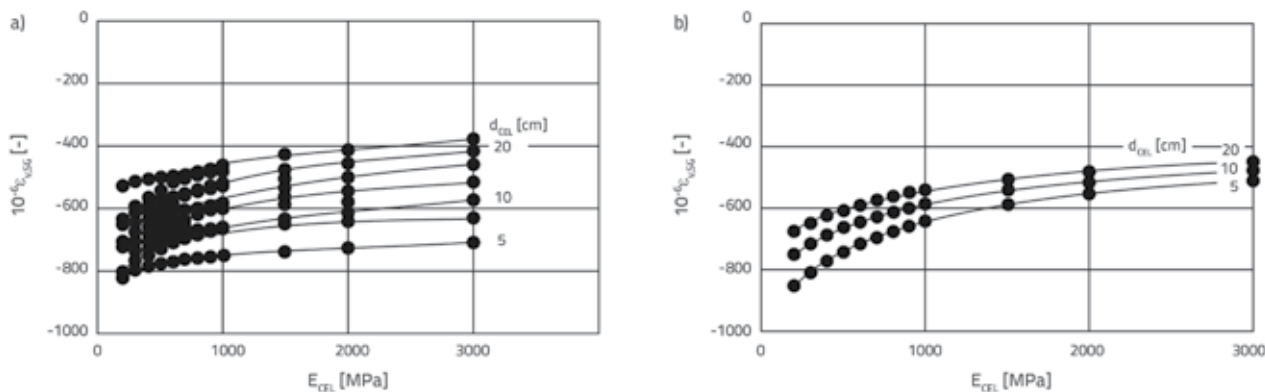
Na slici 12.a prikazana je korelacija između vertikalne deformacije posteljice  $\epsilon_{v,SG}$  i krutosti geočelija  $E_{CEL}$ , za geočelije smještene neposredno ispod asfaltnog sloja, a za razne debljine geočelija  $d_{CEL}$  i krutosti posteljice  $E_{SG}$ . Rezultati pokazuju da krutost geočelija  $E_{CEL}$  ne utječe bitno na vertikalnu deformaciju posteljice  $\epsilon_{v,SG}$ . Međutim, debljina geočelija  $d_{CEL}$  znatno utječe na vertikalnu deformaciju posteljice  $\epsilon_{v,SG}$ . Na slici 12.b prikazana je korelacija između vertikalne deformacije posteljice  $\epsilon_{v,SG}$  i krutosti geočelija  $E_{CEL}$  za geočelije u kontaktu s posteljom, a za razne vrijednosti debljine geočelija  $d_{CEL}$ . Rezultati pokazuju da krutost geočelija  $E_{CEL}$  utječe na vertikalnu deformaciju posteljice  $\epsilon_{v,SG}$ . Rezultati za geočelije u nosivom sloju variraju između krajnjih vrijednosti koje su prikazane na slikama 12.a i 12.b, što ovisi o razmaku između geočelija i asfalta. Rezultati pokazuju da je vertikalna deformacija posteljice  $\epsilon_{v,SG}$  manja kada su geočelije smještene niže u nosivom sloju.

### 5.3. Utjecaj ojačanja

Vlačna deformacija asfalta  $\epsilon_{t,A}$  izuzetno je značajna za trajnost kolničkih konstrukcija. Na slici 13.a prikazana je korelacija između maksimalnog broja ponavljanja opterećenja  $N_F$  i debljine asfaltnog sloja  $e_{t,A}$  izraz (14). Kod neojačanog kolnika, rezultati

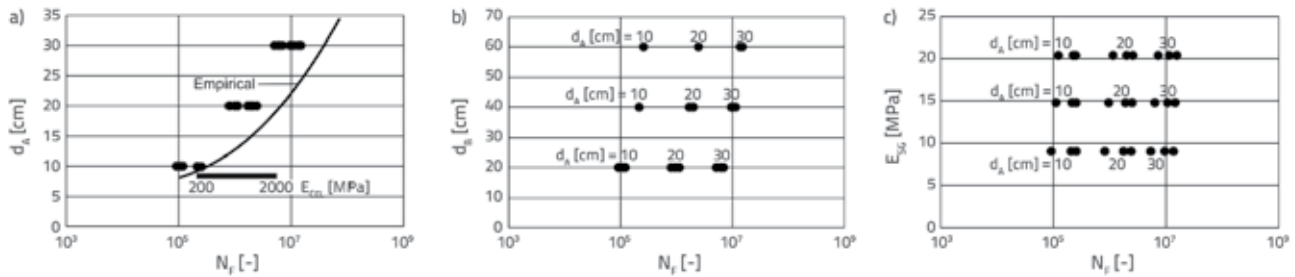


Slika 11. Odnos između vertikalne deformacije u nosivom sloju  $\epsilon_{v,B}$  i krutosti geočelija  $E_{CEL}$  za razne debljine geočelija  $d_{CEL}$ : a) geočelije su postavljene neposredno ispod asfaltnog sloja; b) geočelije su u kontaktu s posteljom



Slika 12. Odnos između vertikalne deformacije posteljice  $\epsilon_{v,SG}$  i krutosti geočelija  $E_{CEL}$  za razne debljine geočelija  $d_{CEL}$ : a) geočelije su postavljene neposredno ispod asfaltnog sloja; b) geočelije su u kontaktu s posteljom





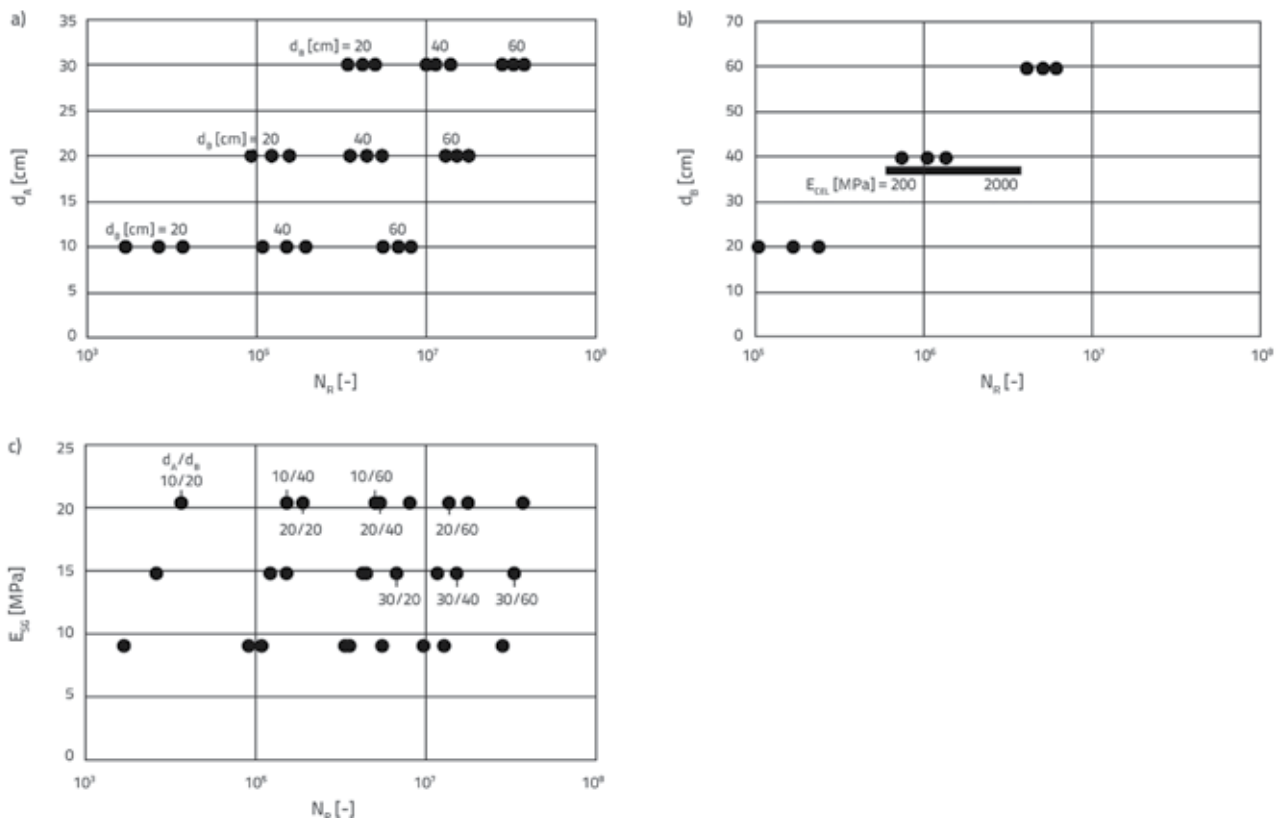
Slika 13. a) odnos između broja ponavljanja opterećenja  $N_F$  tijekom trajanja i debljine asfaltnog sloja  $d_A$  za neojačani kolnik (MKE i empirijska metoda) - usporedba s povećanjem broja ponavljanja opterećenja  $N_F$  tijekom trajanja konstrukcije za konstantnu debljinu asfaltnog sloja i povećanu krutost geočelija; b) odnos između broja ponavljanja opterećenja  $N_F$  tijekom trajanja konstrukcije i debljine nosivog sloja  $d_B$ ; c) ODNOS između broja ponavljanja opterećenja  $N_F$  u vijeku trajanja konstrukcije i krutosti posteljice  $E_{SG}$

analize MKE slični su rezultatima koji su dobiveni empirijskom metodom [31], pri čemu se ne uzimaju u obzir uvjeti u posteljici; broj prolazaka ovisio je samo o dimenzijama asfalta. Broj ponavljanja opterećenja značajno raste kada je kolnik ojačan na vrhu nosivog sloja geočelijama debljine od samo 5 cm (ovisno o krutosti geočelija). Isto tako je iskazana i korelacija između maksimalnog broja ponavljanja opterećenja  $N_F$  i debljine nosivog sloja  $d_B$  (slika 13.b), a također i korelacija između maksimalnog broja ponavljanja opterećenja  $N_F$  i krutosti posteljice  $E_{SG}$  (slika 13.c).

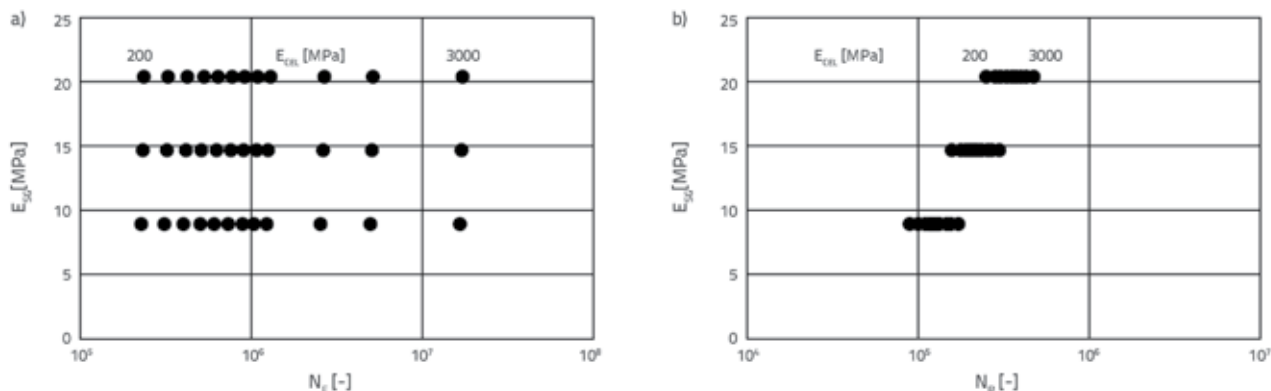
Vertikalna deformacija posteljice  $\varepsilon_{v,SG}$  izuzetno je važna za trajnost kolničkih konstrukcija. Na slici 14.a prikazana je

korelacija između maksimalnog broja ponavljanja opterećenja  $N_R$  i debljine asfaltnog sloja  $d_A$  (izraz 17) za razne debljine nosivog sloja  $d_B$  i za razne krutosti posteljice  $E_{SG}$ . Isto tako je iskazana i korelacija između maksimalnog broja ponavljanja opterećenja  $N_F$  i debljine nosivog sloja  $d_B$  (slika 14.b), a također i korelacija između maksimalnog broja ponavljanja opterećenja  $N_F$  i krutosti posteljice  $E_{SG}$  (slika 14.d). Na slici 14.c prikazan je odnos između maksimalnog broja ponavljanja opterećenja  $N_R$  i debljine nosivog sloja  $d_B$  (izraz 17) za neojačan kolnik i za kolnik ojačan na dnu nosivog sloja geočelijama debljine 5 cm.

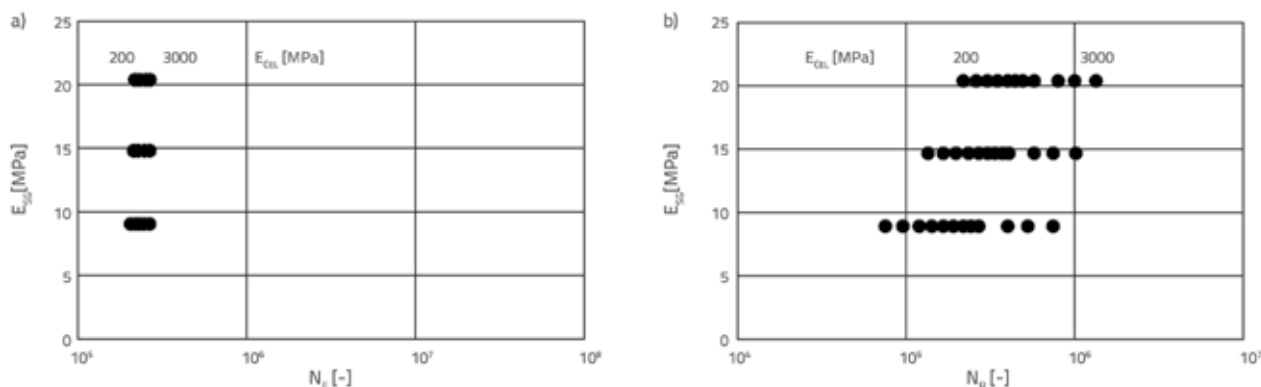
Rezultati pokazuju da geočelije postavljene neposredno ispod asfalta bitno utječu na broj ponavljanja opterećenja  $N_F$  tijekom



Slika 14. Odnos između broja ponavljanja opterećenja  $N_R$  tijekom trajanja konstrukcije i debljine asfaltnog sloja: a)  $d_A$ ; b)  $d_B$ ; c)  $d_B$  ( $d_A = 10$  cm) - usporedba s povećanjem broja ponavljanja opterećenja  $N_R$  tijekom trajanja konstrukcije za konstantnu debljinu asfaltnog sloja i povećanu krutost geočelija; d) odnos između broja ponavljanja opterećenja  $N_R$  tijekom trajanja konstrukcije i krutosti posteljice  $E_{SG}$



Slika 15. Odnos između broja ponavljanja opterećenja: a)  $N_F$  tijekom trajanja konstrukcije i krutosti posteljice  $E_{sg}$  (geočelije postavljene neposredno ispod asfalta); b)  $N_R$  u vijeku trajanja konstrukcije i krutosti posteljice  $E_{sg}$  (geočelije postavljene neposredno ispod asfalta)



Slika 16. Odnos između broja ponavljanja opterećenja  $N_R$  tijekom trajanja konstrukcije i krutosti posteljice  $E_{sg}$ : a) geočelije u kontaktu s posteljom; b) geočelije u kontaktu s posteljom

trajanja konstrukcije (vlačna deformacija asfaltnog sloja, slika 15.a) te da malo utječu na broj ponavljanja opterećenja  $N_F$  tijekom trajanja konstrukcije (vertikalna deformacija posteljice, slika 15.b).

Situacija je sasvim drugačija kod geočelija u kontaktu s posteljom: one malo utječu na broj ponavljanja opterećenja  $N_F$  u vijeku trajanja konstrukcije (vlačna deformacija asfaltnog sloja, slika 16.a), ali bitno utječu na broj ponavljanja opterećenja  $N_R$  u vijeku trajanja konstrukcije (vertikalna deformacija posteljice, slika 16.b).

### 6. Zaključak

Parametarska ispitivanja i detaljna istraživanja provedena su u svrhu analize inovativnog pristupa projektiranju savitljivih kolničkih konstrukcija ojačanih geočelijama. Opsežna istraživanja provedena u tu svrhu uključuju: analize analitičkih rješenja, numeričke analize, parametarsko ispitivanje, eksperimentalne analize, eksperimentalna laboratorijska i terenska ispitivanja. U ovom radu je prikazano parametarsko ispitivanje, a postignuti rezultati u skladu su sa spomenutim analizama.

Parametarska studija provedena je na temelju rezultata dobivenih metodom konačnih elemenata. Analiza u okviru

metode konačnih elemenata obuhvatila je ispitivanje neojačanih kolnika i kolnika ojačanih geočelijama za razne položaje geočelija te za razne vrijednosti krutosti i debljine geočelija. Na temelju parametarskog ispitivanja mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- Geočelije značajno povećavaju kapacitet asfaltnih slojeva kolničkih konstrukcija te smanjuju trajne deformacije u asfaltu. Zato bi se primjenom geočelija mogla bitno smanjiti debljina asfaltnog sloja i/ili produžiti trajnost kolničkih konstrukcija.
- Rezultati pokazuju da naponsko-deformacijsko stanje slojeva u kolniku u najvećoj mjeri ovisi o mjestu na kojem se nalaze geočelije u nosivom sloju, te o krutosti geočelija. Ako su geočelije postavljene neposredno ispod asfalta, tada krutost geočelija bitno utječe na vrijednosti vlačne deformacije asfalta.
- Krutost i visina geočelija također bitno utječu na vrijednosti vertikalnih deformacija u nosivom sloju, ali ne utječu bitno na vertikalnu deformaciju u posteljici.
- Visina geočelija također bitno utječe na vrijednosti vlačne deformacije asfalta.
- Kada se geočelije postavje na vrh posteljice, tada krutost i visina geočelija utječu na vertikalne deformacije nosivog sloja te na vertikalne deformacije u posteljici, a ne utječu bitno na

vlačnu deformaciju asfalta. Taj se utjecaj bitno smanjuje kada razmak između geocelija i asfalta postane veći od 1 cm.

- Kada se geocelije postavljene na dno nosivog sloja, povećava se nosivost posteljice i smanjuju se trajne vertikalne deformacije nosivog sloja. Geocelije utječu na smanjenje posmičnih deformacija u nosivom sloju izravno na mjestu ojačanja.

Zaključak parametarskog ispitivanja glasi: geocelije utječu na vlačnu deformaciju asfalta samo kada su postavljene na mjesto kontakta s asfaltom, ili neposredno ispod asfalta. Kada su postavljene niže u nosivom sloju, tada se bitno smanjuje utjecaj na asfalt. Geocelije postavljene dublje ili na dnu nosivog sloja poboljšavaju nosivost posteljice i smanjuju trajne vertikalne deformacije nosivog sloja.

## LITERATURA

- [1] Road Statistics Yearbook, European Union Road Federation, <http://www.erf.be/images/Statistics/ADPrint-ERFSTATS2016.pdf>, 2016
- [2] Cowland, J., Wong, S.: Performance of a Road Embankment on Soft Clay Supported on a Geocell Mattress Foundation, *Geotextiles and Geomembranes*, pp. 687-705, 1993, [https://doi.org/10.1016/0266-1144\(93\)90046-Q](https://doi.org/10.1016/0266-1144(93)90046-Q)
- [3] Dash, S.K., Sireesh, S., Sitharam, T.: Model studies on circular footing supported on geocell reinforced sand underlain by soft clay, *Geotextiles and Geomembranes*, pp. 197-219, 2003, [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(03\)00017-7](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(03)00017-7)
- [4] Dash, S., Rajagopal, K., Krishnaswamy, K.: Behaviour of geocell reinforced sand beds under strip loading. *Canadian Geotechnical Journal*, 44 (2007), pp. 905-916, <https://doi.org/10.1139/t07-035>
- [5] Yang, X., Han, J., Pokharel, SK, Manandhar, C., Parsons, RL., Leshchinsky, D.: Accelerated pavement testing of unpaved roads with geocellreinforced sand bases, *Geotextiles and Geomembranes*, 32 (2012), pp. 95-103.
- [6] Bathurst, R., Karpurapu, R.: Large scale triaxial compression testing of geocell reinforced granular soils. *Geotechnical Testing Journal*, 16 (1993) 3., pp. 296-303.
- [7] Rajagopal, K., Krishnaswamy, N.R., Madhavi Latha, G.: Behavior of sand confined in single and multiple geocells. *Geotextiles and Geomembranes*, 3 (1999) 154, pp. 171-184.
- [8] Mengelt, M., Edil, T., Benson, C.: Resilient modulus and plastic deformation of soil confined in a geocell. *Geosynthetics International*, 5 (2006).
- [9] Wasseloo, J., Visser, A., Rust, E.: The stress-strain behaviour of multiple cell geocell packs. *Geotextiles and Geomembranes*, 27 (2009), pp. 31-38, <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2008.05.009>
- [10] Pokharel, S.K., Letchinsky, D., Parsons, R.L., Halahmi, I.: Investigation of factors influencing behaviour of single geocell-reinforced bases under static loading, *Geotextiles and Geomembranes*, 28 (2010), pp. 570-578, <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2010.06.002>
- [11] Al-Qadi, I., Hughes, J.: Geocell subgrade stabilization, Washington DC: US Department of Transportation, 1999.
- [12] Latha, G.M., Dash, S., Rajagopal, K.: Numerical simulation of the behavior of geocell reinforced sand in foundations. *International Journal of Geomechanics ASCE*, 9 (2009) 4, pp. 143-152, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2009\)9:4\(143\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2009)9:4(143))
- [13] Lenart, S., Medved, S.P., Zlender, B.: Laboratory testing of pavement structure by traffic load simulation, *Proceedings of the 19<sup>th</sup> ICSMGE*, 2017, Seoul
- [14] Medved, S.P., Žlender, B., Lenart, S., Jelušič, P.: Modeling of geocell-reinforced pavement - experimental validation, *Acta Geotechnica Slovenica*, 2 (2016), pp. 3-14.
- [15] Medved, S.P., Žlender, B., Lenart, S.: Geocell reinforced pavement, 1<sup>st</sup> International Conference on Construction Materials for Sustainable Future - CoMS 2017, Zadar, 2017.
- [16] Zhou, H., Wen, X.: Model studies on geogrid- or geocell-reinforced sand cushion on soft soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 26 (2008), pp. 231-238, <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2007.10.002>
- [17] Ling, Z., Zhao, M., Shi, C., Zhao, H.: Bearing capacity of geocell reinforcement in embankment engineering. *Geotextiles and Geomembranes*, 28 (2010), pp. 475-482, <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2009.12.011>
- [18] Avesani, N., Bueno, B., Futai, M.: A bearing capacity calculation method for soil reinforced with a geocell. *Geosynthetics International*, 3 (2013).
- [19] Witczak, M., Uzan, J.: The Universal Airport Pavement Design System: Granular Material Characterization. University of Maryland, Department of Civil Engineering, Maryland, 1988
- [20] Austroroads Ltd, Development of a Nonlinear Finite Element Pavement Response to Load Model, 2012.
- [21] European Standard EN 1744:2003 Tests for mechanical and physical properties of aggregates
- [22] European Standard EN 993:2003 Tests for geometrical properties of aggregates
- [23] European Standard EN 1097:2003 Tests for mechanical and physical properties of aggregates
- [24] European Standard EN 12697-24: 2004
- [25] European Standard, SIST EN 13286-7:2004 Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 7. Repeated load triaxial test for unbound mixtures.
- [26] Hornych, P., Corte, J., Paute, J.: Etude des déformations permanentes sous chargements répétés de trois graves non traitées, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 184 (1993), pp. 45-55.
- [27] Finn, F.N., Saraf, C.L., Kulkrani, R., Nair, K., Smith, W., Abdulah, A.: Development of Pavement Structural Subsystems, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 291, Washington, DC, 1986
- [28] Tseng, K., Layton, R.: Prediction of Permanent Deformation in Flexible Pavements Materials in Implication of Aggregates in the Design, Construction, and Performance of Flexible Pavements, *American Society for Testing and Materials*, 1989

- [29] Everstress Pavement Analysis Programs, Washington State Department of Transportation, s.l.: Olympia, WA., 1999
- [30] PLAXIS B.V, Reference Manual for Plaxis 2D version 8.0. Delft: s.n., 2006
- [31] TSC 06.520: 2008 Projektiranje, Dimenzioniranje novih asfaltnih vozišćnih konstrukcij, Ur. l. RS, št. 65/09, DRSC, 2009.